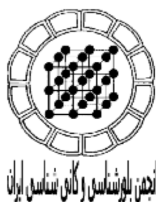
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و سوم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۴، از صفحهٔ ۴۱۷ تا ۴۲۸



ریخت‌شناسی تورمالین در گرانیت‌های مشهد (g^2) با استفاده از آنالیز فراکتال و تئوری اجتماع با انتشار محدود (DLA)

زهرا طهماسبی* ، فرهاد زال، احمد احمدی خلجی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان

(دریافت مقاله: ۹۳/۲/۲۵ ، نسخه نهایی: ۹۳/۶/۸)

چکیده: بر اساس مشاهدات صحرایی، تورمالین‌های واقع در لوکوگرانیت‌های مشهد به دو دسته‌ی نودولی (گره‌ای) و خوشه‌ای (دندریتی) تقسیم می‌شوند. هندسه فراکتال ابزاری برای اندازه‌گیری اشکال نامنظم است. بر اساس روش مربع شمار که یکی از ابزارهای هندسه فراکتال است بین بعد فراکتال و بی نظمی اشکال، ارتباط مستقیمی وجود دارد به‌طوری که اجسام با بی‌نظمی بیشتر دارای بعد فراکتال بزرگتری هستند. تورمالین‌های گرهکی (متمایل به دراویت) و دندریتی (شورلیت) حاصل فعالیت‌های مراحل تأخیری ماگمایی-اند. تفاوت در نرخ یا سرعت رشد، کشش سطحی، گرمای نهان تبلور که در نهایت باعث بی نظمی می‌شوند، از فاکتورهای اصلی تشکیل شکل‌های متنوع تورمالین در منطقه‌ی مورد بررسی هستند. سردشدگی سریع بلورهای تورمالین در مراحل انتهایی تبلور ماگما، باعث ایجاد یک سطح ناهمگن با کشش سطحی متفاوت می‌شود. نقاط با کشش سطحی پایین، بلورهای ریزتر را بیشتر متبلور می‌کنند و همین رخداد منجر به بالا رفتن گرمای نهان تبلور و در نهایت بی‌نظمی و ویژگی‌های فراکتالی بیشتر مانند شکل‌های دندریتی می‌شود. در مورد شکل‌های گرهکی انباشت مواد فرار و بخارهای در درون حفره‌ها باعث اختلاف فشار در بیرون و درون حفره خواهد شد. فشار بیشتر بیرون حفره نسبت به درون آن باعث حرکت مواد مغذی از حاشیه به درون و مرکز حفره خواهد شد. تبلور در مرکز موجب بالا رفتن گرمای نهان تبلور در مرکز، اختلاف گرادیان دمایی و در نهایت جریان همرفتی و تبلور گرهک‌های تورمالین با بی‌نظمی بیشتر درون حفره می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *فراکتال؛ کشش سطحی؛ گرمای نهان؛ بی‌نظمی؛ تورمالین دندریتی و گرهکی؛ گرانیت مشهد.*

مقدمه

تفسیر پیچیدگی پیکربندی‌های شکل‌های طبیعی در همه‌ی زمینه‌های علمی از زیست‌شناسی تا دینامیک جریان، بررسی و پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است [۲،۱]. برای سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی عواملی مانند دما، فشار، غلظت و غیره ممکن است باعث رشد بلورهای بهم پیوسته و در نهایت بافت‌های شگفت انگیزی شود، به ویژه در مورد سنگ-های آذرین که بافت‌هایی مانند بافت‌های دندریتی، اسکلتی و سوزنی به‌خاطر سرد شدن مکرر گدازه ایجاد می‌شوند [۴،۳]. چنانچه گدازه به‌سرعت سرد شود کانی‌های سیلیکاتی اغلب شکل‌های خوشه‌ای و یا گرد شده می‌سازند و بافت‌های دندریتی در کانی‌های سیلیکاتی در شرایطی که نرخ تبلور سریع‌تر از نرخ انتشار شیمیایی است، شکل می‌گیرند [۵]. معمولاً این شرایط در اثر گرادیان دمای مشخص و انتشار آرام و یا هر دو صورت می‌گردد. بافت‌های دندریتی در اثر تقسیم‌شدن ذرات نوک تیز، به‌صورتی که هر شاخه به دو شاخه در طول انتشار تبدیل می‌شود صورت می‌گیرد [۶]. بافت‌های آذرین نیز شرایط فیزیکی و شیمیایی معینی را که متبلور شده‌اند ثبت

* نویسنده مسئول، تلفن-نمابر: ۰۶۶۱۶۲۰۰۰۰۵، پست الکترونیکی: zahra_tak@yahoo.com

می‌کنند و در نتیجه حاوی اطلاعات مفیدی در مورد تکامل سیستم ماگمایی خود هستند [۷]. آنچه می‌توان گفت این است که به‌طور کلی رشد هر بلور تحت تأثیر عملکرد سه فاکتور هسته بندی، انتشار سرعت رشد بلور و عدم عملکرد هر یک از این عوامل موجد شکل‌های نامتعادل می‌شود به‌طوری که ممکن است در اثر سرد شدن سریع یا انتشار محدود مواد مغذی صورت گیرد [۸]. بافت‌های مشابهی نیز در آزمایشگاه به خاطر سرد شدن بسیار زیاد، آفریده می‌شوند [۹،۱۰] و با استفاده از محاسبه‌ی عددی رشد (انباشت با انتشار محدود) شبیه سازی شده‌اند [۱۱]. در این مرجع آمده است که این ساخت‌های خوشه‌ای (شاخه‌ای) را با استفاده از هندسه‌ی فراکتال که میزان بی قاعدگی (بی نظمی) شکل‌ها را نشان می‌دهد می‌توان اندازه گیری کرد. کارهای علمی در مورد رشد بلور در ماگمای سیلیکاتی و سیستم های دیگری مانند دانه برفی [۱۲]، گرهکی و شکل‌پذیری [۵] مشخص کرد که شاخه‌ها (دندریت‌ها) حاصل رشد در شرایط با انتشار محدودند. رشد بلور می‌تواند هم به صورت متعادل و هم به‌صورت نامتعادل باشد و در واقع تبلور، تلاش برای رسیدن به تعادل است. بنابراین تمامی رشد بلورها به یک دور شدگی از حالت تعادل نیاز دارد [۱۳]. در این مقاله سعی شده است تا ریخت‌شناسی متنوع تورمالین در گرانیت مشهد (g^2) با استفاده از آنالیز فراکتال و شبیه سازی رشد آن‌ها با به کارگیری مدل انباشت با انتشار محدود (DLA) مورد بررسی قرار گیرد.

زمین‌شناسی عمومی و توصیف صحرایی و سنگ‌شناختی تورمالین

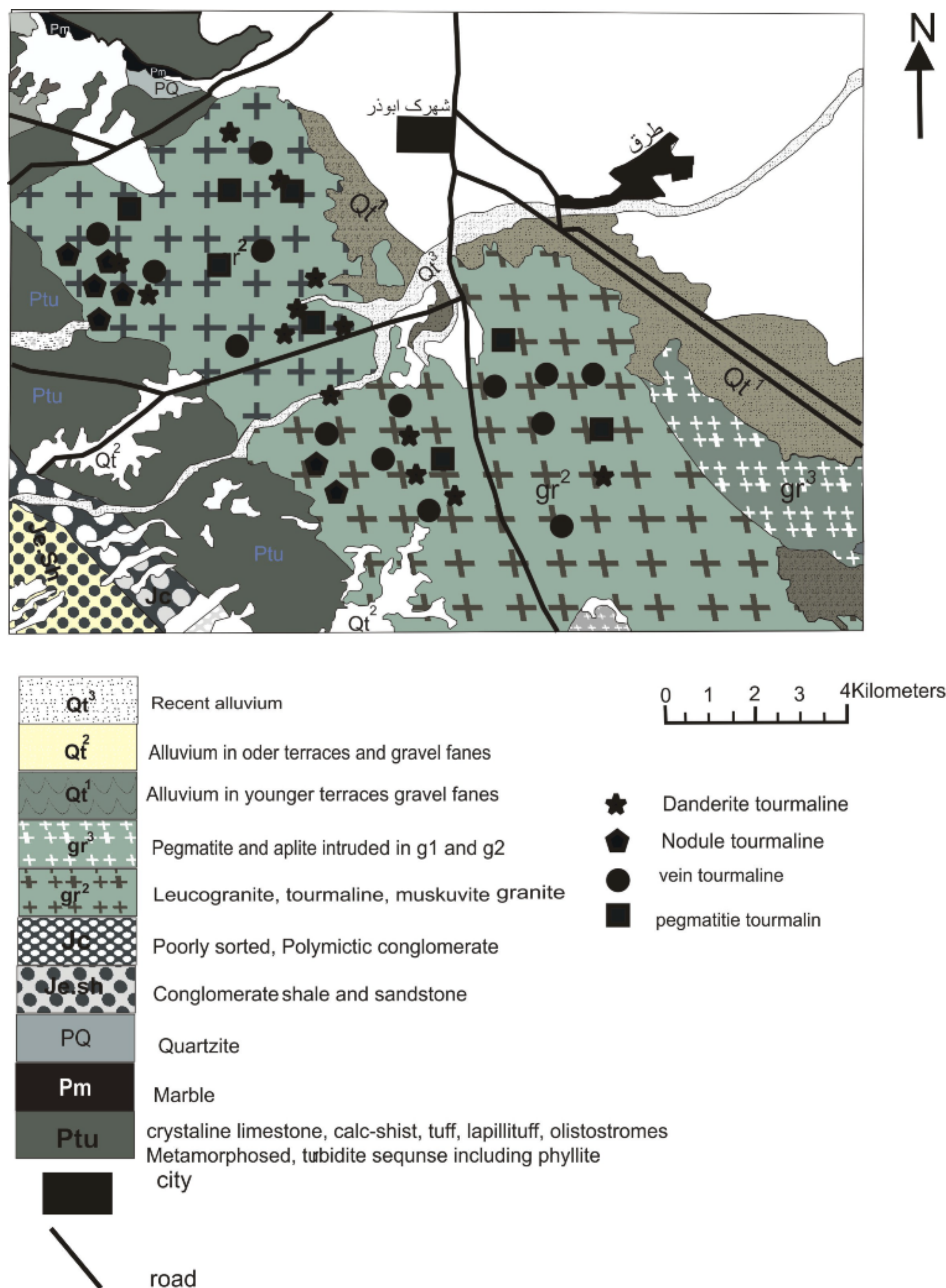
منطقه‌ی مورد بررسی در گستره‌ی ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد قرار گرفته است و بخشی از منطقه‌ی بینالود محسوب می‌شود. مرز جنوبی این منطقه‌ی، گسل میامی یا گسل شاهرود و مرز شمال غربی آن را گسل سمنان می‌دانند. منطقه‌ی مورد بررسی محدود به ´۱۵°۳۶-´ ۷° ۳۶ عرض جغرافیایی و ´۴۵ ° ۵۹ – ´ ۳۲° ۵۹ طول جغرافیایی است (شکل ۱). شواهد زمین‌شناسی و تعیین سن مطلق نشان داده‌اند که فازهای دگرگونی و گرانیت‌زایی اولیه در این زون به فازکوهزایی هرسی نین و بعدها در تریاس میانی نیز مجموعاً تحت تأثیر دگرگونی‌های سیمرین پیشین قرار گرفته است. از نظر ماگماتیسم، سه فاز اصلی در منطقه‌ی بینالود تشخیص داده شده‌اند. فاز نخست بیشتر گرانودیوریتی (g^1) است و در نواحی جنوب شرق گسترش دارد و برونبوم‌های آن درون لوکوگرانیت (g^2) دیده می‌شود. در فاز پنوماتولیتی رگه‌های پگماتیتی و آپلیتی همه‌ی این مجموعه را قطع می‌کند (g3). [۱۴] لوکوگرانیت‌های جنوب مشهد را از نوع برخوردی (Collision Type) و S، و سن آن‌ها را راتین، تریاس بالایی می‌داند. [۱۵] سن جایگزینی توده‌ی گرانیتی را به‌روش پتاسیم ــ آرگن ژوراسیک بالا - کرتاسه زیرین می‌داند ولی با توجه به وجود قطعات بزرگ گرانیتی در قاعده سازند کشف رود (باژوسین) از یک طرف و با توجه به این که توده‌ی نفوذی مجموعه‌ی افیولیتی مشهد و رسوب‌های توربیدایتی با سن تریاس را قطع می‌کند و سن تریاس بالایی ــژوراسیک زیرین قابل قبول‌تر است.

کانی‌های تورمالین در درون لوکوگرانیت‌های دو میکایی منطقه‌ی مورد بررسی به‌رنگ سیاه دیده می‌شوند که ترکیب شورل و متمایل به دراویت دارند [۱۶، شکل ۲] و به‌شکل‌های زیر دیده می‌شوند:

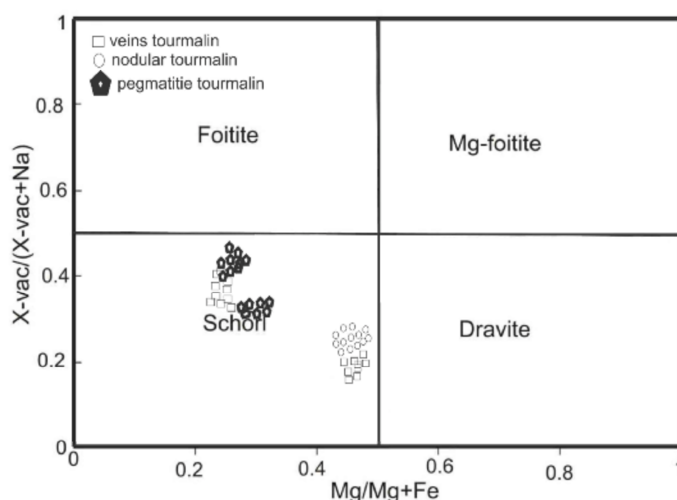
۱) تورمالین‌های خورشیدی (دندریتی): این نوع از تورمالین‌ها در بخش‌های زیادی از منطقه‌ی مورد بررسی دیده می‌شوند و بیشتر به‌شکل رگه‌ای هستند و در مکان‌هایی که این رگه‌ها به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی و یا فرسایش و ایجاد درز، مقطع قائم آن‌ها نمایان می‌شود در سطح سنگ میزبان و به‌صورت سطحی و به‌شکل خورشیدی دیده می‌شوند (شکل۳، الف). سنگ میزبان از نظر کانی‌شناسی حاوی مسکوویت، بیوتیت، میکروکلین، ارتوکلاز، کوارتز، پلاژیوکلاز هستند و دارای بافت‌های میرمکیتی، نیمه شکل‌دار دانه‌ای و پرتیتی هستند. تورمالین‌ها در این مقاطع دارای چند رنگی سبز مایل به قهوه‌ای‌اند و دارای منطقه‌بندی است به‌طوری که در مرکز به‌رنگ سبز آبی و در حاشیه به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شوند (شکل۳، ب). در بعضی مکان‌ها تورمالین در مجاور مسکوویت‌ها قرار دارند اما بیشتر در کنار کوارتز و فلدسپات‌ها دیده می‌شوند. تورمالین‌ها در این مناطق دارای شکستگی زیادی هستند.

۲) تورمالین‌های گرهکی: در منطقه‌ی خلج، از گرانیت دو میکایی حاوی تورمالین‌های با شکل‌های گرهکی هستند. در بعضی از این گرهک‌های تورمالینی، هاله‌ی واکنشی در پیرامونشان دیده شده‌اند که این رخداد می‌تواند به‌دلیل مبادله‌های یونی بین سنگ میزبان و مرکز گرهک باشند و این منجر به پایداری بیشتر مرکز گرهک نسبت به حاشیه آن شده است. هاله روشن گرهک بدون کانی‌های مافیک از جمله بیوتیت است

و عبارتند از کوارتز، فلدسپار پتاسیم و مسکوویت هستند. هسته‌ی گرهک‌ها عبارتند از تورمالین، و کوارتز و رگه‌های دارای تورمالین هستند که ارتباطی با گرهک‌ها ندارند. این گرهک‌ها به‌صورت نامنظم در سنگ میزبان پراکنده‌اند (شکل ۴ الف و ب). این شکل‌ها دارای پیکربندی‌های متفاوتی از گرد شده تا بی‌قاعده هستند و در بعضی موارد کشیدگی خاصی (لوله مانند) دارند. در سطح این شکل‌ها حفره‌های زیادی مشاهده می‌شوند [۱۶]. سنگ میزبان از نظر کانی‌شناسی حاوی کوارتز، تورمالین، پلاژیوکلاز، مسکوویت، بیوتیت، میکروکلین، ارتوکلاز و کانی تیره است و بافت آن میرمکیتی و دانه‌ای است. کانی تورمالین به‌صورت چند رنگی سبز مایل به قهوه‌ای دیده می‌شود و هسته‌ی قهوه‌ای و حاشیه‌ی مایل به سبز دارد (شکل ۴ پ).

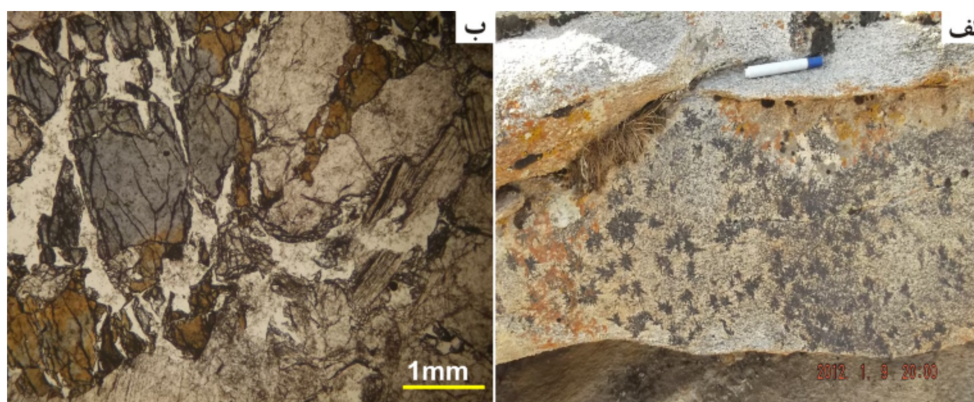


شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی (برگرفته از نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد)



شکل ۲ ترکیب تورمالین‌های مورد بررسی: تورمالین‌ها در گستره‌ی شورلیت و متمایل به دراویت قرار می‌گیرند (داده‌ها از [۱۶] اقتباس شده‌اند).

.



شکل۳ الف) تصویری از تورمالین‌های خورشیدی در منطقه، ب) تصویری از نمونه تورمالین در زیر میکروسکوپ.



شکل ۴ الف) تورمالین‌های پراکنده در سنگ میزبان، ب) تورمالین‌های گرهکی در منطقه، پ) تصویر میکروسکوپی از تورمالین‌های منطقه.

روش تحقیق و بحث

برای بیان روش نخست از هندسه‌ی فراکتال بحث می‌شود. واژه‌ی فراکتال واژه‌ی جدیدی است که توسط [۱۷] برای بیان شکل‌های یا پدیده‌هایی که طول مشخص ندارند به‌کار برده شد. خاستگاه این لغت صفت لاتین fractal به معنی شکسته است.

هندسه‌ی فراکتال ابزاری برای اندازه‌گیری ابعاد شکل‌های بی-قاعده است که در هندسه کلاسیک قابل بررسی نیستند. در حقیقت کاربرد آنالیز فراکتال برای بررسی فرآیندهایی است که در سیستم‌های ماگمایی نامنظم عمل می‌کنند [۱۹،۱۸]. بر همین اساس ترکیب بررسی‌های سنگ‌شناسی کلاسیک و

دینامیک طیف جدیدی از پژوهش‌های سنگ‌شناسی ایجاد می‌کند [۲۱،۲۰]. این ابعاد از آن جهت که داده‌های دنیای واقعی را معرفی می‌کنند و با آزمایش اندازه‌گیری می‌شوند، اهمیت دارند. برای اندازه‌گیری بعد فراکتالی از روش‌های متعددی استفاده می‌شود: ۱- استفاده از روش مربع شمار، ۲- استفاده از روابط اندازه‌گیری فراکتالی، ۳- استفاده از تابع تطبیق، ۴- استفاده از تابع توزیع، ۵- استفاده از طیف توانی. با توجه به اینکه در این مقاله از روش مربع شمار استفاده شده، لذا در زیر به بررسی آن می‌پردازیم.

روش کار با استفاده ازهندسه فراکتال و روش الگوریتم مربع شمار

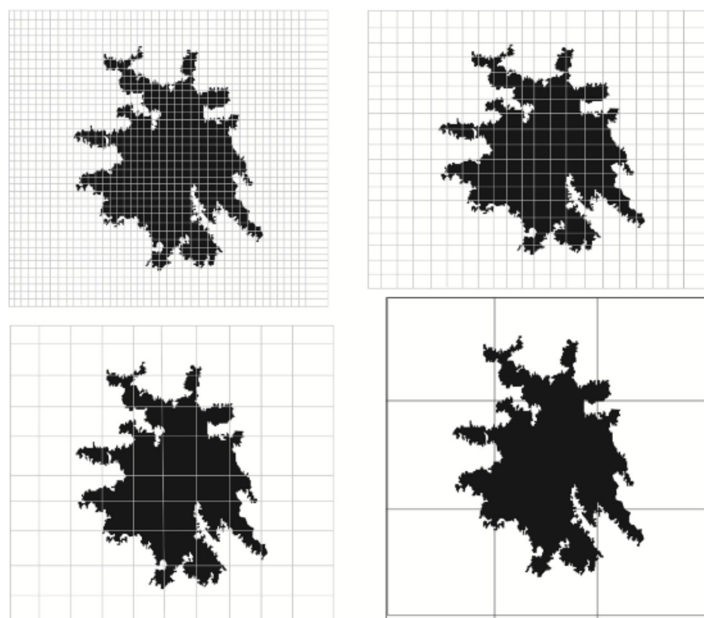
نخست تصاویر مورد نظر از تورمالین‌های گرهکی و دندریتی از منطقه تهیه شدند و سپس ۲۰ تصویر از تورمالین‌های گرهکی و ۲۰ تورمالین خورشیدی را با استفاده از نرم افزار آنالیز عکس Image J وکورل دراو به‌صورت عکس‌های مضاعف سیاه و سفید تبدیل شدند (شکل ۵). سپس تصاویر با استفاده از همین نرم افزارها شبکه‌بندی شدند صورتی که فضای اقلیدسی با ابعادی به‌طول r تقسیم شده و سپس مربع‌هایی به تعداد N(r) برای پوشاندن یک شکل داده شده لازم است شماش شدند. در این روش از پنج اندازه‌ی مختلف برای تقسیم بندی مربع‌ها (r (یعنی به ترتیب ۳،۶،۱۳،۲۷،۵۴ میلیمتر استفاده شدند و با هر اندازه‌ی جدا از هم تعداد مربع‌هائی را که تصویر را پوشش می‌دهند شمارش شدند و سپس نقاط روی نمودار شکل ۶-الف رسم شد. در این حالت نقاط به‌صورت منحنی ظاهر می‌شوند. برای محاسبه بعد فراکتال که در واقع بعد وابستگی پوشش مربعاتی N(r) در با r متغیر است، به‌دست می‌آید (طبق فرمول ۱ [۱۷]) که نیازمند محاسبه شیب خط است. برای این کار از لگاریتم معادله‌های (۱)، و (۲) نتیجه‌ها به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$N(r)=r^{-D\ box} \qquad (۱)$$

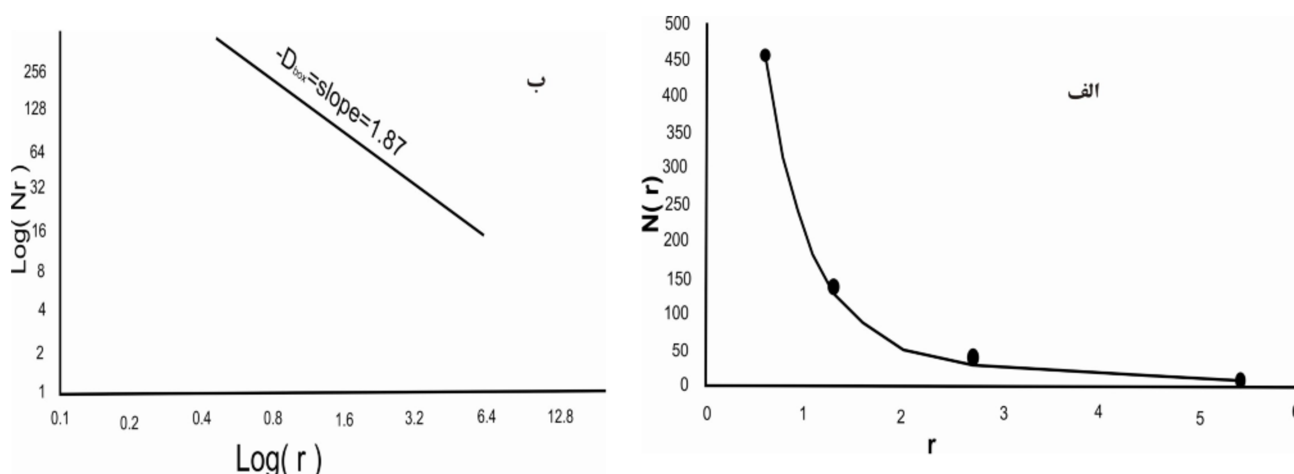
$$Log(N_r)= -D_{box}.Log(r) \qquad (۲)$$

در واقع با لگاریتم (r) و N(r) و رسم نمودار لگاریتمی (شکل۶ ب)، نقاط به‌صورت یک خط مستقیم در می‌آید و با محاسبه‌ی شیب این خط می‌توان بعد فراکتال را محاسبه کرد.

ویژگی فراکتالی ریخت‌شناسی تورمالین‌ها در (شکل۶ ب) بنا بر معادله (۲) ترسیم شده است. در این نمودار داده‌ها به صورت خط مستقیمی رسم شده‌اند که با یک توزیع فراکتالی متناسبند. در مورد شکل‌های دندریتی بعد فراکتال از ۱/۷ تا ۱/۸۹ و در انواع گرهکی نیز از ۱/۵۳ تا ۱/۷۸ تغییر می‌کند که در هر دو نوع بیشترین بعد مربوط به شکل‌هایی با بی‌قاعدگی بیشتر است.



شکل ۵ شبکه‌بندی تصاویر با استفاده از نرم افزارimage j و کورل دراو برای محاسبه بعد فراکتال.

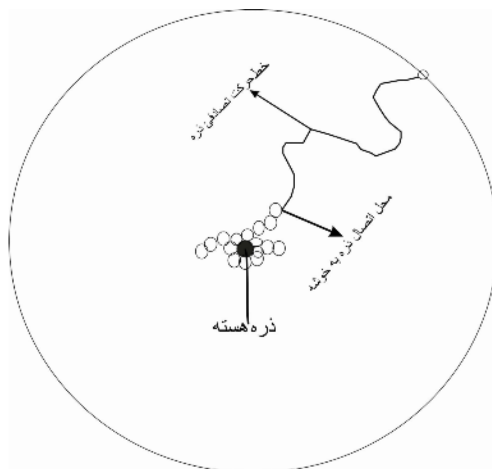


شکل ۶ الف) این نمودار بر اساس اندازه‌ی هر مربع (r) به تعداد کل مربع‌هایی که شکل را پوشش می‌دهند N(r) برای محاسبه‌ی بعد فراکتال طراحی شده است، ب) محاسبه بعد فراکتال با استفاده از نمودار لگاریتمی و رابطه‌ی Log(r) نسبت به Log(Nr) و محاسبه‌ی شیب خط راست به‌عنوان بعد فراکتال.

بررسی شکل‌های تورمالین‌ها بر اساس تئوری انباشت با انتشار محدود (DLA)

بافت‌های شاخه‌ای (دندریتی، خورشیدی) در کانی‌های سیلیکاتی در شرایط با میزان انتشار مواد شیمیایی کند و فرآیند تبلور سریع شکل می‌گیرند [۵]. این بافت‌ها با تقسیم شدن ذرات در نوک به این صورت که در طول انتشار هر شاخه به دو شاخه تبدیل و شناسایی می‌شوند. بافت‌های مشابهی در شرایط آزمایشگاه در طول شرایط سرد شدن سریع با استفاده از الگوریتم رشد ساده‌ای به نام انباشت با انتشار محدود (DLA) شبیه‌سازی شده‌اند. در واقع مدل انباشت با انتشار محدود (DLA) محاسبه‌ی عددی ساده‌ای است از الگوهای رشد بی-قاعده و پیچیده. [۷ و ۲۲] نشان دادند که انباشت با انتشار محدود (DLA) می‌تواند شکل‌های فراکتالی گرد شده تا شدیداً بی‌قاعده‌ای مانند تورمالین گرهکی و دندریتی در منطقه‌ی مورد نظر را توضیح دهد. بر اساس نظریه‌ی [۲۲ و ۲۳] روش DLA برای استفاده‌ی گسترده بررسی شکل‌گیری ریخت‌شناسی متنوع دانه برفی، با در نظر گرفتن درجه‌ی متفاوتی از سرد شدگی زیاد در سیستم مدل شده ساخته شده است.[۱۱] نشان داد که این ساخت‌های انشعابی (DLA) با استفاده از هندسه‌ی فراکتال که بیان کننده‌ی میزان بی قاعدگی شکل‌هاست اندازه-گیری می‌شوند و در واقع بعد فراکتال خوشه‌ای DLA به شکل هندسی آن‌ها وابسته است[۲۴]. در ساز و کار تشکیل خوشه‌ی DLA، معمولاً یک ذره هسته‌ای ثابت در مرکز یک دایره در نظر گرفته می‌شود سپس ذره‌ای دیگر در فاصله‌ی بیشتری از هسته شکل می‌گیرد و با حرکت تصادفی (براونی) یا به هسته متصل می‌شود و یا به بی‌نهایت فرار می‌کند. ذره‌ی سومی که وارد سیستم می‌شود تا زمانی که بتواند به ذره‌ی دوم بچسبد یا به بی‌نهایت راه یابد حرکت تصادفی دارد. در این فرآیند ذره‌ی بعدی که به خوشه متصل می‌شود خود یک ذره‌ی نوک تیز خواهد شد. در نهایت با اتصال هر ذره‌ی به نوک ذره‌ی قبلی شعاع خوشه رشد می‌کند (شکل ۷). خوشه‌ای که به‌وسیله این فرآیند ایجاد می‌شود هم پرشاخه و هم فراکتالی است. دلیل تشکیل ساختار فراکتالی (انشعابی)، رشد سریع‌تر بخش‌هایی از خوشه است که نسبت به بخش‌های دیگر بیشتر در تماس با ذرات وارد شده قرار می‌گیرند [۲۴]. بنابراین شکل‌های حاصل از فرآیند رشد DLA به چسبیدن احتمالی ذره‌ی (p(n)) وابسته‌اند به‌طوری که هرچه p(n) بزرگ‌تر باشد، شکل‌های با بیشترین بی‌قاعدگی و در جهت الگوهای فراکتال دندریتی حرکت می‌کنند. در واقع p(n) احتمال حرکت ذره‌ای است که به خوشه‌های در حال رشد ملحق خواهد شد [۷] . در مقیاس دو بعدی DLA دارای چهار یا پنج شاخه بزرگ است که پایداری کم یا زیادی دارد و هر شاخه همزمان با شاخه‌ی دیگر در یک مقیاس طولی متغیر کنترل می‌شود به‌طوری که در مقیاس طولی کوچک‌تر، شاخه‌ها در یک چرخه برای بقای خود

رقابت می‌کنند [۲۴]. در واقع از هر دو شاخه‌ی همسایه، حداکثر یکی زنده خواهد ماند و به‌عنوان خوشه رشد خواهد کرد. مرگ شاخه‌ها به‌وسیله شاخه‌های مجاور و با شکل‌گیری شاخه‌های جدید از طریق تقسیم شدن نوک، کنترل می‌شود. این تصور از شاخه‌های DLA به مدل رشد شاخه‌ای منجر می‌شود که در آن رقابت در تمام مقیاس طولی بین شاخه‌ها به‌عنوان یک سیستم پویا عمل می‌کند [۲۵]. از این رو توجه زیادی به‌تبلور دندریتی در دامنه‌ی پخش‌شدگی به‌عنوان یک مسئله از ناپایداری سطحی و نیز به‌عنوان مسئله‌ای از الگوی تشکیل در سیستم‌های غیرخطی و نامتعادل جلب شده است [۲۶ و ۲۷]. ساز و کار رشد دندریتی به‌صورت تئوریک به‌عنوان مسئله ناپایداری سطحی در یک سیستم غیرخطی با شرایط ناهمسانگرد یا کشش سطحی بررسی شده است [۲۸ و ۲۹]. در بررسی‌هایی که توسط روش هل – شاو روی رشد خوشه‌ها صورت گرفته، خوشه‌های DLA ویژگی‌هایی از رشد احتمالی در سطح خوشه را نشان می‌دهند. در این روش چگالی ذره‌ها با حرکت تصادفی (براونی) با استفاده از معادله‌ی لاپلاس به‌دست می‌آید و در آن سطح خوشه یک سطح با چگالی ثابت ایجاد می‌کند که احتمال رشد در سطح در اثر اختلاف چگالی در سطح خوشه و محیط اطرافش تعیین می‌شود. از این رو در آن سطح اولیه با کناره‌های منحصر به فرد در زمان محدودی پس از شروع رشد، تولید خواهد شد که به آن بی‌ثباتی در انجماد گفته می‌شود. سپس برای محفوظ ماندن این نقاط منحصر به فرد، تأثیرهای فیزیکی دیگری مانند کشش سطحی در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. [۲۹] مدلی با لایه‌های مرزی را نشان داد که شاخه‌های جانبی متوالی در دندریت‌ها به‌وسیله تقویت بی‌نظمی نزدیک به‌ذرات، نوک‌ها ساخته می‌شوند. از این رو مدل‌های رشد متنوعی همچون تقسیم ذرات نوک و رشد نوسانی ذرات نوک در فازهای ناهمسانگرد فوق سردشده به‌دست آمده است [۳۰]. انواع متنوعی از مدل انباشت با ارتباط دادن بین DLA و رشد واقعی بلور به‌وسیله تأثیر کشش سطحی [۳۲،۳۱]، پارامتر بی‌نظمی [۱۲] و فرآیند جنبش سطحی [۳۳] شکل گرفته‌اند.



شکل ۷ تصویری از هسته گذاری و چگونگی اتصال ذرات به خوشه با حرکت تصادفی [۱۷].

برپایه‌ی شبیه سازی انجام شده توسط [۷] حرکت، یک ذره در زمان به‌صورت $U(x, t)$ بیان می‌شود و معادله $\Delta U(x, t)$ در واقع حرکت کتره‌ای یک ذره را بیان می‌کند. در طی فرایند DLA فرض می شود که ذرات متصل به خوشه‌ی حاوی تمام اجزای ضروری ریخت‌شناسی هستند. معادله $\Delta U(x, t)$ با توجه به رابطه‌ی گیبس و تامپسون به‌صورت:

$$T_{int}=T_M(1 - yk/H)$$

است که T_{int} و T_M به ترتیب دمای حد فاصل (دمای بین مرزها) و دمای ذوب، y کشش سطحی و k انحراف محلی از سطح و H گرمای نهان تبلور است. برای شبیه‌سازی شرایط گیبس و تامپسون، [۳۲] مدل اصلی DLA را اصلاح کرد. با توجه به این که احتمال چسبیدن ذره به‌سطح اجتماع به انحراف محلی از سطح وابسته است. کمیت $n_l – n_0$ به‌عنوان براوردی از میانگین انحراف محلی در نظر گرفته می‌شود به‌طوری که $n_l = N_L/L^2$ و $n_0 = (L - 1)/2L$ که N_L تعدادی از ذرات مربوط به اجتماع است که در یک سلول به اندازه $L×L$ متمرکز هستند. بنابراین وابستگی چسبندگی احتمالی $P(n)$ به انحراف K به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(n) = A(n - n_0) + B$$

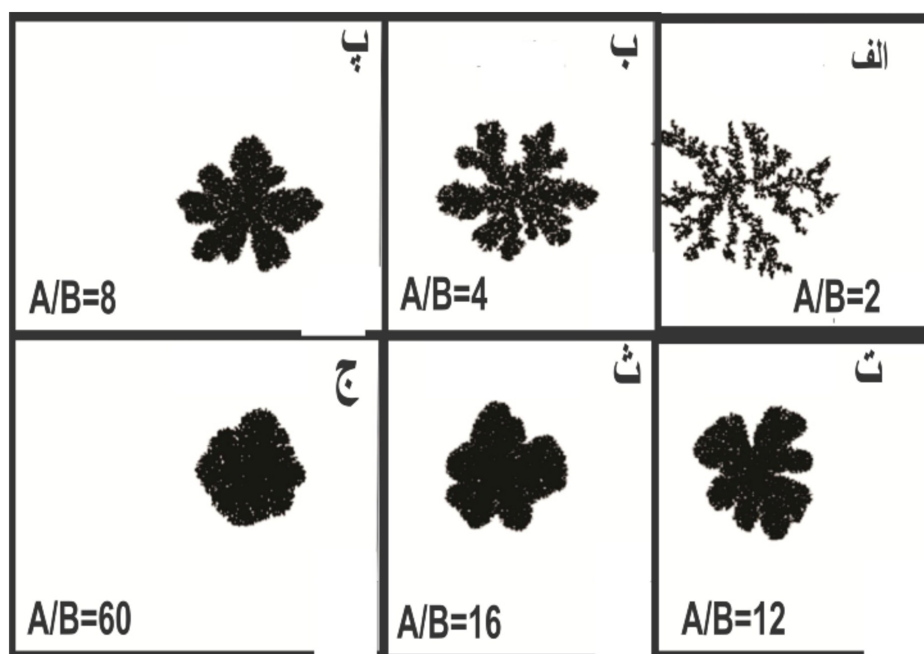
A و B ثابت هستند. این معادله با رابطه گیبس و تامپسون به صورت زیر ارتباط داده می‌شود

$$P(n)=B\{1 - A/B(n - n_0)\}$$

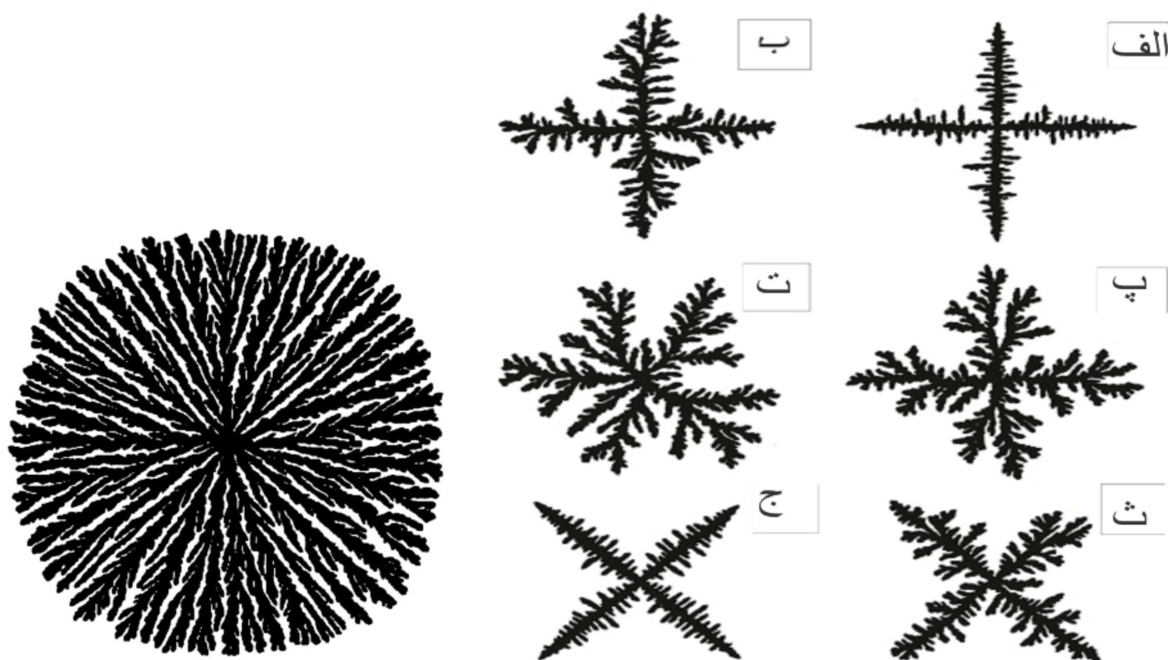
به‌طوری که $B = T_M$ و $A/B = y/H$ و $(n - n_0) = K$.

نکته قابل توجه این است که مقدار P(n) پارامتر حاکم در فرایند رشد DLA است و به مقدار انحراف (K) و A و B وابسته است. انحراف (K) یک خاصیت اصلی برای رشد ریخت-شناسی هاست و نمی‌تواند پیشاپیش معلوم باشد. در مقابل A و B می‌توانند در آغاز شبیه سازی انتخاب شوند و در نتیجه آن‌ها به‌طور کلی سازوکار رشد را کنترل می‌کنند. به‌طوری که در بالا نشان داده شد نسبت A/B، میزانی از کشش سطحی و گرمای نهان است، بنابراین این دو پارامتر اصلی کنترل کننده فرآیند تبلور در یک مذاب فوق سردشده هستند و نقشی بسیار مهم بازی می‌کنند. در شکل (۸) نتیجه‌ی شبیه‌سازی DLA را با در نظر گرفتن 2×10^5 ذره برای مقدار متفاوت از نسبت A/B را نشان می‌دهد که در آن میزان نسبت A/B از نرخ کم (A/B = 2) تا نرخ بیشتر (A/B = 60) تغییر می‌کند و شکل انباشت‌ها نیز بر همین اساس از بسیار دندریتی (مانند نهشت منگنز در سنگ آهک) در جهت بی‌قاعدگی کمتر و گرد شده حرکت می‌کنند (شکل۶). در نمونه‌های طبیعی، ساختار بسیار دندریتی مانند آن‌هایی که به‌دست آمده‌اند با نسبت A/B□4 به‌وجود نمی‌آید و نشان می‌دهد که چنین سازوکاری از رشد برای عمل سیستم طبیعی محتمل نیست. آن‌ها نشان دادند که بین بعد فراکتال و نسبت A/B رابطه‌ای وجود دارد و نشان می‌دهند که بی‌قاعدگی شکل‌ها با تغییر در نسبت A/B تغییر می‌کند.

بر اساس بررسی‌های بالا می‌توان گفت ذرات با انتشار سطحی، هستند جایگاه نیمه پایداری از سطح انرژی را اشغال می‌کنند و این ذرات در اثر انرژی گرمایی از سطحی به سطح دیگر انتقال می‌یابند. بنابراین فرآیندهایی که در تبلور چنین ذراتی دخیل هستند عبارتند از: پایداری در محلی که انرژی سطحی پایینی دارند و دیگر اینکه هسته بندی، حاصل از افزایش غلظت ذرات دارای انتشار سطحی است [۶]. فرآیند انتشار سطحی در همگن شدن غلظت سطحی و رشد هسته تأثیر می‌گذارد به این صورت که رشد هسته با افزایش همگن شدگی افزایش می‌یابد و در این حالت کشش سطحی نیز افزایش می‌یابد و الگو در جهتی با کشش سطحی ضعیف رشد می‌کند. ساختارهای DLA با سازوکاری از نوع تقسیم شدن ذرات نوکدار ساخته شده‌اند و این سازوکار تقسیم شدگی ذرات نوک‌دار، به افزایش تصادفی بی‌نظمی در میدان و یا به نوسان در سطح الگو وابسته‌اند [۶] (شکل۹الف). در شبیه سازی [۲۴]، سطوح دارای کشش سطحی ضعیف ناپایدارترند و رشد بیشتر و نیز بعد فراکتال بزرگ‌تری دارند. با افزایش بی‌نظمی،



شکل ۸ شبیه‌سازی رشد خوشه‌ها با استفاده از نسبت‌های مختلف A/B که با تغییر این نسبت بی‌قاعدگی شکل‌ها نیز تغییر می‌کند [۱۷].



شکل ۹ مکانیسم تقسیم شدگی ذرات نوک در رشد شکل را نشان می‌دهد [۶].

رشد تصادفی ذرات سطحی افزایش می‌یابد و انتشار سطحی ذرات که باعث افزایش همگنی الگو می‌شود افزایش می‌یابد. در الگوهای دندریتی تقسیم شدن ذرات نوک‌دار باعث تشکیل الگوی همگن می‌شود (شکل ۹ب). برپایه‌ی بررسی‌های رشد بلور، شرایط مرزی حاصل از ناهمسانگردی و بی‌نظمی برای تشکیل الگوی دندریتی در دامنه‌ای از پخش شدن ذرات ضروری هستند و برای تشکیل شکل‌های دندریتی در شرط ناهمسانگردی و تقسیم ذرات نوکدار اهمیت دارند. کشش سطحی ضعیف و ناهمسانگردی مانند اثر چسبندگی در روش هل – شاو، عمل می‌کنند. چون در روش هل - شاو عامل رشد خوشه اختلاف گرادیان فشار در سطح خوشه‌ای و محیط اطرافش است، بنابراین کشش سطحی و گرمای نهان عامل کنترل کننده‌ی شکل‌ها هستند. کشش سطحی زیاد به انرژی سطحی زیاد وابسته است و در طول رشد بلور بر اساس قانون گیبس انرژی سطحی بلور تمایل به کمتر شدن دارد و در نتیجه سطوح با انرژی بالا نسبت به سطوح با انرژی سطحی پایین رشد کمتری دارند و انرژی سطحی عامل محدود کننده‌ی رشد است. از طرف دیگر بنابر [۳۴] در مکان‌های با جریان همرفتی بالا، شار گرمای نهان زیاد است و مکان‌های با نرخ رشد بالاتر نیز دارای شار گرمای نهان بیشتری دارند. بر این اساس میزان تمرکز عناصر مغذی برای رشد گرهک به‌وسیله‌ی این جریان-های همرفتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه این فعالیت-های همرفتی، بیهنجاری را در بین مرزها افزایش می‌دهد و شکل‌های بی قاعده‌تر را تولید می‌کند و با توجه به اینکه دوری از تعادل عامل اصلی رشد بلور است. این عامل در ایجاد حالت عدم تعادل در رشد بلور است.

برداشت

در شکل‌های تورمالین‌های موجود در منطقه‌ی مورد نظر، با توجه به شواهد صحرایی و برداشت از مطالب بالا، باید گفت که شکل‌های با بی‌قاعدگی بیشتر، دارای بعد فراکتال بیشتری نیز هستند. در مورد شکل‌های دندریتی موجود در رگه‌ها، بی شک

آن‌ها حاصل از فعالیت‌های پسا ماگمایی‌اند [۳۵] اما در رابطه با چگونگی تشکیل شکل آن‌ها، می‌توان گفت که در طول سرد شدن سریع، نخست اولین بلورهای تورمالین در مرکز شکل با ایجاد سطح همگنی تشکیل شده‌اند ولی با افزایش سرعت سرد شدگی نرخ رشد تغییر کرده و سطح توده به‌صورت ناهمگن در آمده و کشش سطحی در سطح توده نیز به‌صورت ناهمسان عمل کرده است. در نقاط با کشش سطحی پایین رشد بیشتری صورت می‌گیرد این رشد با تبلور ریز کانی‌های تورمالین همراه است و در نتیجه در محل رشد به‌دلیل تبلور، گرمای نهان تبلور نیز بالا می‌رود که این خود باعث افزایش بی‌نظمی و در نتیجه ناهمسانگردی بیشتر در سطح در حال رشد می‌شود که این عامل اصلی تقسیم‌شدن ذرات در نوک و ایجاد شکل‌های دندریتی است. در واقع این فرآیندها در جهت همگن کردن الگو عمل می‌کنند و تلاش برای رسیدن به حالت نزدیک به تعادل است. اما در مورد شکل‌های گرهکی، باید گفت که طی سرد شدن ماگما و جدایش بیشتر توده، بخارها و مواد فرار در درون حفره‌ها قرار می‌گیرند و همراه با ماگما سرد می‌شوند. اما در درون این حفره‌ها فشار کمتر از بیرون است و در نتیجه این اختلاف گرادیان فشار باعث حرکت مواد از حاشیه به درون حفره می‌شود. در نتیجه در مرکز حفره اولین بلورهای تورمالین متبلور می‌شود. از طرف دیگر به‌دلیل تبلور کانی در درون حفره، گرمای درون آن بیشتر از اطرافش خواهد شد و نتیجه یک گرادیان دمایی نیز به سمت خارج ایجاد می‌شود. به‌طور کلی شکل‌گیری این گرادیان‌ها باعث تشکیل جریان‌های همرفتی در این حفره‌ها شده و موجب انتقال مواد مورد نیاز رشد تورمالین از حاشیه به درون حفره می‌شود. از این رو محل‌های با جریان همرفتی بالا نشان دهنده‌ی گرمای نهان بالاتر نیز هستند که نرخ رشد در این مکان‌ها بیشتر است که موجب افزایش بی‌نظمی در سطح می‌شود و در نتیجه نقاط دارای همگنی کمتر که دارای کشش سطحی کمتری نیز هستند، رشد می‌کنند و باعث تشکیل گره‌های با بی‌نظمی بیشتر خواهند شد.

مراجع

[1] Ottino J.M., Leong C.W., Rising H., Swanson PD., *"Morphological structures produced by mixing in chaotic flow"*, Nature 333 (1988) 419–425.

[2] Chaplain M.A.J., Singh G.D., McLachlan J.C., *"On growth and form: spatio-temporal pattern formation in biology"*, Wiley, New York, (1999) 436.

[3] Cashman K.V., "Relationship between crystallization and cooling rate: insight from textural studies of dikes", Contribution to Mineralogy and Petrology 113 (1993) 126–142.

[4] Faure F., Trolliard G., Nicollet C., Montel J.M., *"A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling"*, Contribution to Mineralogy and Petrology 145 (2003) 251–263.

[5] Keith H.D., Padden F.J., *"A phenomenological theory of spherulite crystallization"*, Journal of Applied Physics 34 (1963) 2409-2421.

[6] Shonosuke O.H.T.A., *"Diffusion- Limited Aggregation and Crystal growth"*, KTK Scientific publishers (1991) 220-233.

[7] Perugini D., Poli G., *"Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy) an example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system"*, Contribution to Mineralogy and Petrology 153 (2007) 493-494.

[8] Shelley D., *"Igneous and metamorphic rocks under the microscope",* (1993) 150-160.

[9] Lofgren G., *"An experimental study of plagioclase morphology: isothermal crystallization",* American Journal of Science 274 (1974) 243-273.

[10] Donaldson C.H., *"Olivine crystal types in Harrisitic Rocks of the Rhum Pluton and in*

Archean Spinifex Rocks", Geological Society of America. Buellton 85(1974) 1721-1726.

[11] Fowler A.D., Stanley H.E., Daccord G., *"Disequilibrium silicate mineral text fractal and non-fractal features"*, Nature 341(1989) 134-138.

[12] Nittmann J., Stanley H.E., "*Tip splitting without interfacial tension and dendritic growth patterns arising from molecular anisotropy*", Nature 321 (1986) 663-668.

[13] Anthony D.F., Daniel E.R., *"A model and simulation of branching mineral growth from cooling contacts and glasses"*, Mineralogical Magazine 60 (1996) 595-601.

[۱۴] کریم پور م.ح.، فارمر ج.ل.، استرن س.ر.، *"ژئوشیمی رادیوایزوتوپ های Sm-Nd،Rb-Sr سن سنجی زیرکن U-Pb و تعیین منشأ لیکوگرانیت های خواجه مراد، مشهد"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۸۰ (۱۳۸۸)، ص۱۸۲-۱۷۱.

[15] Alberti A., Moazez Z., *"Plutonic and metamorphic rocks of the Mashhad area (northeastern Iran, Khorasan)"*, Bulletine Societa Geologica Italiana 93 (1974) 1157-1196.

[۱۶] زال ف.، *"ژئوشیمی و تعیین خاستگاه تورمالین های گرانیت های جنوب شرق مشهد (منطقه خلج و خواجه مراد)"*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان.

[17] Mandelbrot B.B., *"The fractal geometry of nature"*, W.H Freeman, New York, (1982) 480.

[18] Flinders J., Clemens J.D., *"Non-linear dynamics, chaos, complexity and enclaves in granitoid magmas"*, Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences 87 (1996) 225–232.

[19] Perugini D., Poli G., *"Chaotic dynamics and fractals in magmatic interaction processes: a different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves"*, Earth Planet Scinec Letters 175 (2000) 93–103.

[20] Perugini D., Poli G., *"Viscous fingering during replenishment of felsic magma chambers by continuous inputs of mafic magmas: field evidence and fluid-mechanics experiments"*, Geology 33 (2005) 5–8.

[21] Perugini D., Poli G., Mazzuoli R., *"Chaotic advection, fractals and diffusion during mixing of magmas: evidence from lava flows"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 124 (2003a) 255–279.

[22] Vicsek T., *"Fractal growth phenomena"*, World Scientific, Singapore, (1992) 488.

[23] Goold N.R., Somfai E., Ball C.R., *"Anisotropic diffusion limited aggregation in three dimensions: universality and nonuniversality"*, Physical Review E 72 (2005) 1-14.

[24] Halsey T.C., *"Diffusion-Limited Aggregation: A Model for Pattern Formation"*, Physics Today 53 (2000) 36-41.

[25] Kessler D.A., Koplik J., Levine H., *"Geometric models of interface evolution.III. Theory of dendritic growth"*, Physical Review A 31 (1985) 1712-1717.

[26] Bechhoefer J., Libchaber A., *"Testing shape selection in directional solidification"*, physical Review B 35 (1987) 1393-1396.

[27] Langer J.S., *"Instabilities and pattern formation in crystal growth"*, Reviews of Modern Physics 52 (1980) 1-28.

[28] Langer J.S., *"Dendrites,viscous fingers, and the theory of pattern formation"*, Scinece 243 (1989) 1150-1156.

[29] Langer J.S., *"Existence of needle crystals in local models of solidification"*, Physical Review A 33 (1986) 435-441.

[30] Honjo H., Ohta S., Matsushita M., *"Phase diagram of a growing succinonitrile crystal in supercooling-anisotropy phase space"*, Physical Review A 36 (1987) 4555-4558.

[31] Vicsek T., *"Formation of solidifivation patterns in aggregation models"*, Physical Review A 32 (1984) 3084-3089.

[32] Vicsek T., *"Formation of solidification patterns in aggregation models"*, Physical Review A 32 (1985) 3084–3089.

[33] Xiao R., Alexander J.I.D., Rosenberger F., *"Morphological evolution of growing crystals: A Mnte Carlo simulation",* Physical Review A 38 (1988) 2447-2456.

[34] Nagatani T., *"Convection effect on the diffusion-limited aggregation fractal: renormalization-group approach"*, Physical Review A 37 (1988) 4461–4468.

[35] Rozendaal A., Bruwer L., *"Tourmaline nodules: indicator of hydrothermal alteration and Sn–Zn–(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa"*, Journal African Earth Science 21 (1995) 141–155.